
MODELACIÓN DE UNA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO UTILIZANDO LOS MÓDULOS DINÁMICOS OBTENIDOS EN LABORATORIO APLICANDO LAS METODOLOGÍAS MARSHALL Y SUPERPAVE

•

Carlos Rodolfo Marín Uribe¹
María Rosa Guzmán Meléndez²

•

Recibido: 03/03/2007

Aceptado: 24/09/2007

Resumen

El programa SHRP (Strategic Highway Research Program) a través del nuevo método de diseño de mezclas asfálticas en caliente “Superpave”, ha impulsado el desarrollo de investigaciones con el fin de obtener mezclas asfálticas más durables, resistentes y en general, que muestren un comportamiento superior como su nombre lo indica. Entonces, es importante conocer los estados de esfuerzos y deformaciones que se producen al modelar una estructura de pavimento con capas de rodadura, compuestas con mezclas asfálticas diseñadas por métodos distintos (Marshall y

¹ Ingeniero Civil de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, especialista y magíster en Ingeniería de Vías Terrestres de la Universidad del Cauca, Auditor interno en Aseguramiento de la Calidad Normas ISO 9000. Docente de tiempo completo en el programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Medellín, Medellín, Antioquia, Colombia. Coordinador del Área de Geotecnia.

e-mail: cmarin@udem.edu.co, caromaur72@hotmail.com

² Ingeniera Civil de la Universidad del Cauca, especialista y magíster en Ingeniería de Vías Terrestres de la Universidad del Cauca. Docente de tiempo completo del programa de Ingeniería Civil de la Universidad del Quindío, Quindío, Armenia, Colombia. Jefa del Área de Vías.

e-mail: mrguzman@uniquindio.edu.co; meryrose@hotmail.com

Superpave) y, por supuesto, con una caracterización dinámica diferente (leyes de fatiga, módulos dinámicos y respuesta al ahuellamiento). Esta modelación permite tener una idea general de la capacidad estructural para soportar el tránsito durante su vida útil representada en el valor de N (Número de ejes equivalentes de carga) y quizá obtener algunos indicios de posibles ahorros en costos de conservación de los pavimentos, razones fundamentales para apoyar e incentivar la implementación del método Superpave como nuevo diseño de las mezclas asfálticas en caliente.

Palabras clave

Mezcla asfáltica, Superpave, Marshall, módulo dinámico, ley de fatiga.

MODELING OF A PAVEMENT STRUCTURE USING DYNAMIC MODULES OBTAINED IN A LABORATORY APPLYING MARSHALL AND SUPERPAVE METHODOLOGIES

Abstract

The SHRP (Strategic Highway Research Program) through the new design method of hot asphalt mixtures “Superpave” has promoted the development of researches in order to get more durable and resistant asphalt mixtures that show a superior performance. Then, it is important to know the effort and deformation condition that are produced when modeling a pavement structure with asphalt layers made up of asphalt mixtures designed with different methods (Marshall and Superpave) and therefore, with a different dynamic characterization (fatigue laws, dynamic modules, and deterioration answers). This modeling allows us to have a general idea of the structural capacity to endure traffic throughout its life cycle represented by N value (Number of equivalent loads axis) and perhaps to obtain some hints of possible savings in pavement preservation costs which are basic reasons to support and stimulate the implementation of the Superpave Method as a new design of the hot asphalt mixtures.

Key Words

Asphalted mixture, Superpave, Marshall, dynamic module, fatigue law

INTRODUCCIÓN

Los métodos racionales de diseño de pavimentos parten de una modelación de su estructura, la cual queda definida por el conocimiento de sus espesores y de las características elástico dinámicas de cada una de las capas componentes de la estructura (Benavides, CA y Chavarro E, 2000). La caracterización de los materiales se efectúa mediante la determinación del módulo dinámico, la relación de Poisson y la ley de fatiga (Tosticarelli, J et al, 1989). Es sumamente importante conocer los valores de las sollicitaciones críticas que controlan las fallas asociadas a la fisuración por fatiga o a deformaciones permanentes, para lo cual se hace indispensable conocer los valores de los módulos de los materiales constitutivos de cada una de las capas de la estructura de pavimento.

Teniendo en cuenta que la mezcla asfáltica se encuentra dentro de los materiales a considerar para estimar su módulo y cuyo valor es un insumo básico para la modelación de la estructura de pavimentos, muchos investigadores se han dedicado a proponer nuevas metodologías de elaboración y compactación de las mismas.

En la selección de un método de compactación de laboratorio, los investigadores del programa SHRP se plantearon varias metas. La más importante fue diseñar un equipo que pudiera compactar en forma realista los especímenes de mezcla a la densidad alcanzada bajo condiciones de clima y carga del pavimento. (FHWA-SA-004, 1995).

Es así como fue desarrollado un nuevo compactador: el compactador giratorio Superpave (SGC). Algunos estudios como el realizado por la Nacional Cooperative Highway Research Program (NCHRP) en el año 1988 han concluido que la compactación giratoria produce probetas representativas de los materiales compactados in situ. Esta conclusión está basada en una comparación de varias rigideces y defor-

maciones medidas en núcleos tomados inmediatamente después de la construcción.

Por ello, vale la pena hacer un análisis que nos permita visualizar claramente las diferencias en la modelación de estructuras de pavimentos flexibles teniendo en cuenta mezclas asfálticas elaboradas y diseñadas por distintos métodos, como lo son el tradicional Marshall y la nueva propuesta del programa SHRP, el Superpave.

Ya es conocido por algunos estudios que los módulos dinámicos obtenidos en las mezclas asfálticas diseñadas por el método volumétrico Superpave son notoriamente mayores a los obtenidos en las mezclas tipo Marshall (Guzmán, MR y Marín, CR. 2004), lo que hace evidente que cualquier modelación de estructura de pavimento para obtener los esfuerzos y deformaciones resultantes debido a la imposición de cargas de tránsito a la que está sometida será diferente, dependiendo del módulo dinámico asociado a la capa asfáltica; módulo que, además de diversas variables, dependerá del método de compactación de laboratorio.

Cada vez se hace más importante estudiar el comportamiento de los materiales usados en ingeniería sometidos a cargas dinámicas. Los materiales usados en las estructuras de un pavimento no escapan a esta realidad, por lo que se considera fundamental realizar investigaciones sobre las nuevas metodologías propuestas que ofrecen materiales con mejor desempeño y resistencia; factor importante para el análisis económico, ambiental y técnico respectivo de un proyecto.

Finalmente, se debe tener en cuenta que el comportamiento de una mezcla bajo cargas dinámicas está afectado tanto por la resistencia a la fatiga como por el módulo dinámico; a mayor valor de este último factor se requiere de un menor espesor de la capa asfáltica y viceversa, lo cual representa también una diferencia en el valor económico de construcción de las estructuras de pavimento modeladas.

METODOLOGÍA

Teniendo en cuenta que para efectuar una modelación de una estructura de un pavimento bajo unas condiciones determinadas con el fin de obtener los diferentes esfuerzos y deformaciones que ocurren en ella, se requiere asociar un módulo dinámico a cada una de las capas constitutivas, se llevó a cabo un trabajo completo de laboratorio donde se destacan las siguientes actividades:

- Escogencia de una estructura granulométrica.
- Diseño de las mezclas asfálticas tipo Marshall y Superpave (contenidos óptimos de asfalto).
- Obtención de los módulos dinámicos.
- Deducción de las leyes de fatiga.
- Obtención de los esfuerzos y deformaciones mediante una modelación de la estructura de pavimento con ayuda del programa DEPAV.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Cada una de las actividades anteriormente mencionadas en la metodología, se desarrolló de la siguiente manera:

Estructura granulométrica

Se escogió como estructura granulométrica, una que siguiera las recomendaciones de Superpave, cuyo recorrido no debe pasar por la zona de restricción. Esta zona restringe el uso de arenas redondeadas las cuales no garantizan una buena cohesión de la mezcla; además, generalmente se asocia una excesiva cantidad de granos redondeados con una resistencia al corte muy pobre, lo cual es la principal causa del ahuellamiento en las mezclas asfálticas "(Murphy T, 1998)". La tabla N° 1 muestra la distribución de la granulometría de prueba, mientras que en la figura N° 1 se puede observar el gráfico exponente 0.45 para una mejor visualización de la curva.

Tabla N° 1. Granulometría de prueba

| Tamiz No | Abertura (mm) | Porcentaje que pasa (%) |
|----------|---------------|-------------------------|
| 3/4" | 19 | 100 |
| 1/2" | 12.5 | 95 |
| 3/8" | 9.5 | 83 |
| 4 | 4.75 | 56 |
| 8 | 2.36 | 37 |
| 16 | 1.18 | 22 |
| 30 | 0.6 | 16 |
| 50 | 0.3 | 12 |
| 100 | 0.15 | 8 |
| 200 | 0.075 | 4 |

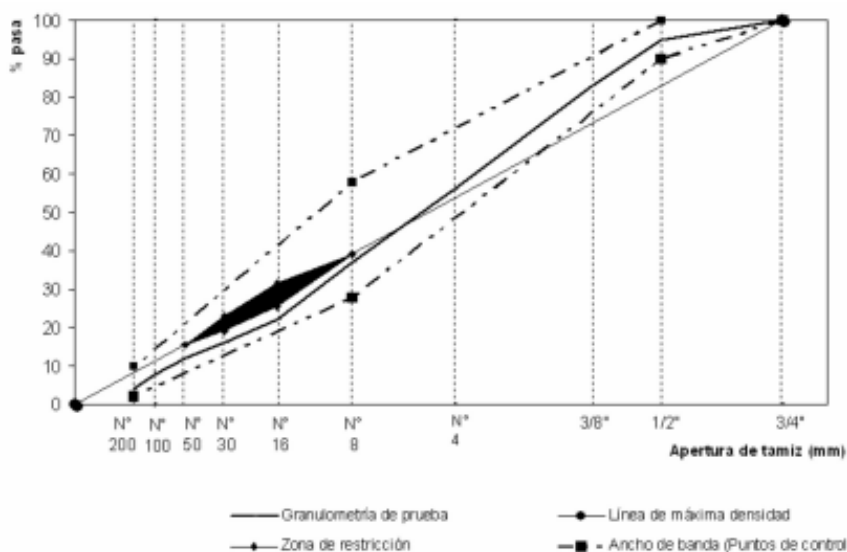


Figura N° 1. Granulometría de prueba en gráfico exponente 0.45

Diseño de las mezclas asfálticas tipo Marshall y Superpave

Para un mismo agregado, estructura granulométrica y asfalto (Barrancabermeja), se consiguieron los correspondientes diseños de las mezclas asfálticas aplicando los métodos Marshall y Superpave, obteniendo las respectivas fórmulas óptimas de trabajo. Es importante mencionar que se garantizó el cumplimiento del requisito de angularidad del agregado fino expresado en la metodología Superpave.

Se determinaron cuatro porcentajes de asfalto para realizar el diseño respectivo para cada una de las metodologías. Por cada porcentaje se fabricaron tres probetas con el fin de garantizar una buena confiabilidad en los valores a obtener. Es decir, para obtener las fórmulas de trabajo por cada metodología se elaboraron 12 probetas.

Tabla N° 2. Diseño muestral para obtención de la fórmula de trabajo.

| Metodología | Número total de probetas |
|-------------|--------------------------|
| Marshall | 12 |
| Superpave | 12 |

Los porcentajes óptimos de asfalto obtenidos aplicando los criterios establecidos para cada metodología fueron idénticos, estableciéndose en un valor de 6.3% (Guzmán, MR y Marín, CR; 2004).

Módulos dinámicos

El diseño muestral se compone de tres probetas por cada valor de módulo dinámico, lo cual nos da un total de nueve probetas por cada una de las metodologías con el objetivo de determinar las curvas maestras. Es importante mencionar que en el procedimiento de obtención del valor del módulo dinámico, a cada una de las probetas se le realizaron dos determinaciones, suministrándonos un total de 9 puntos o valores por cada módulo dinámico en la temperatura evaluada.

Tabla N° 3. Diseño muestral para obtención de las curvas maestras. Módulos dinámicos.

| Metodología | Número de probetas para cada temperatura | Número total de probetas para obtener la curva maestra | Número total de valores determinados para la curvamaestra |
|-------------|--|--|---|
| Marshall | 3 | 9 | 18 |
| Superpave | 3 | 9 | 18 |

Se obtuvieron los valores de los módulos dinámicos de las probetas construidas con las respectivas fórmulas de trabajo (4% de vacíos de aire y el porcentaje óptimo de asfalto). Se analizaron los valores de los módulos a diferentes temperaturas de

prueba, lo cual nos permite construir las curvas maestras. Dichos valores se obtuvieron mediante el uso de un equipo triaxial dinámico tipo Nottingham y se pueden observar en la tabla y figura N° 2.

Tabla N° 4. Módulos dinámicos para probetas Marshall y Superpave

| Temperatura (°C) | Valor del Módulo dinámico según método de diseño (Mpa) | |
|------------------|--|-----------|
| | Marshall | Superpave |
| 20 | 6378 | 10008 |
| 25 | 3226 | 5876 |
| 35 | 1023 | 1248 |

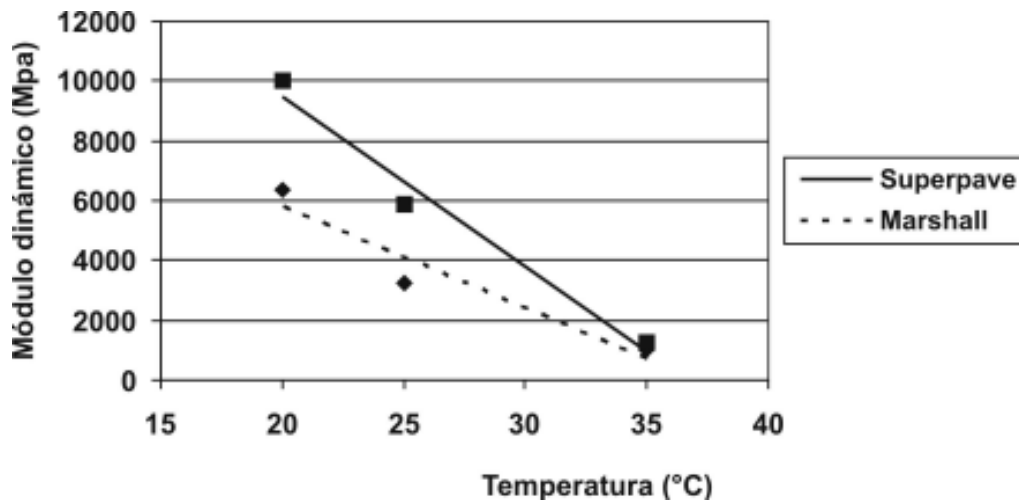


Figura N° 2. Módulos dinámicos

Leyes de fatiga

Generalmente se acepta que en la mayor parte de las situaciones, el tráfico genera un daño por fatiga del material que se inicia en la parte inferior de la capa asfáltica y se propaga hacia la superficie. En el modelo tradicional de fatiga las fisuras se originan en la fibra inferior de la mezcla asfáltica (zona donde la tensión de tracción es mayor) y se propaga verticalmente hacia la superficie del pavi-

mento “(Guzmán, MR; Marín, CR. 2004.)”. Sin embargo, por las condiciones del proyecto no se pudo evaluar cada ley de fatiga en laboratorio, lo que obligó a obtener la curva de comportamiento deducida por el método recomendado por la Shell (Huang, Y, 2002). Las figuras N° 3 y 4 muestran las leyes de comportamiento o fatiga correspondientes para las mezclas elaboradas por el método Marshall y el Superpave (Guzmán, MR y Marín, CR; 2004).

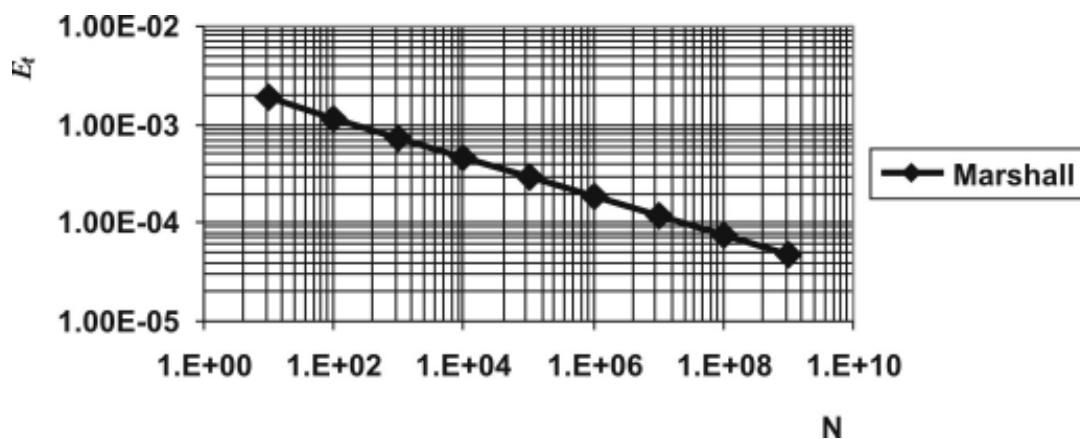


Figura N° 3. Ley de fatiga deducida mezcla Marshall

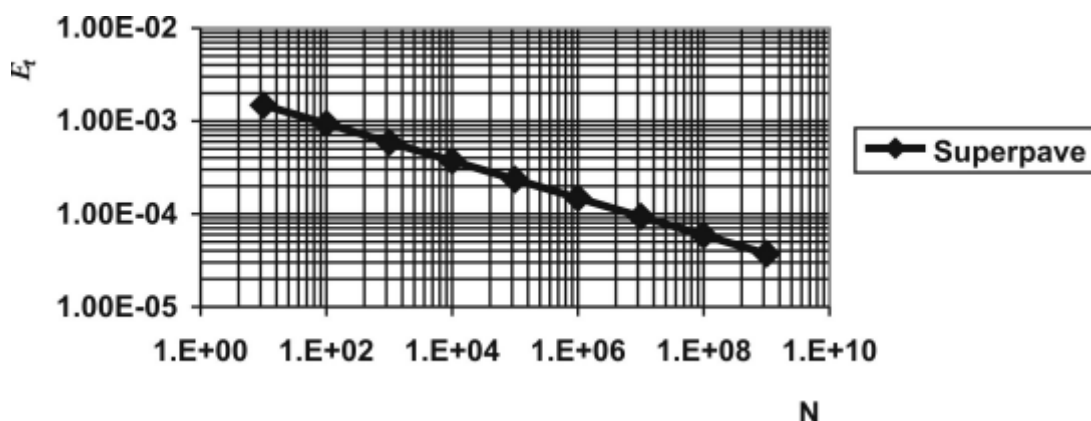


Figura N° 4. Ley de fatiga deducida mezcla Superpave

Modelación con ayuda del programa DEPAV

Se hizo uso del software DEPAV “Diseño Estructural de Pavimentos” “(Solano et al; 1994)” elaborado por la Universidad del Cauca y cuya plataforma es idéntica al software ALIZÉ III francés.

La modelación se hizo con los valores de módulo dinámico a una temperatura de 20°C, dejando constante la calidad y espesores de las demás capas de pavimento y con la condición de capas ligadas entre sí (ver figura N° 5). Los datos de entrada y los valores de esfuerzos y deformaciones para las dos estructuras se pueden visualizar de las tablas N° 3 a la N° 6.

| Tipo de Capa | MARSHALL | Módulo Dinámico (Mpa) | SUPERPAVE | Módulo Dinámico (Mpa) | Espesor capa(Cm) |
|--------------|----------|-----------------------|-----------|------------------------|------------------|
| | | | | | |
| CA | | E ₁ = 6378 | | E ₁ = 10008 | 10 |
| BG | | E ₂ = 630 | | E ₂ = 630 | 20 |
| SBG | | E ₃ = 210 | | E ₃ = 210 | 30 |
| SR | | E ₄ = 70 | | E ₄ = 70 | |

Donde:

CA: Concreto asfáltico

BG: Base Granular

SBG: Subbase granular

SR: Subrasante

Figura N° 5. Datos de entrada para la modelación de las estructuras de pavimento con mezclas asfálticas diseñadas por las metodologías Marshall y Superpave

Tablas N° 5. Parámetros básicos para modelación de la estructura de pavimento usando el módulo dinámico de la mezcla asfáltica tipo Marshall

| Número de Capas [2..6] 7 | | | | |
|--------------------------------------|------------|-----------|--------|-------------|
| Radio de Carga [cm] | | | | 10.8 |
| Presión de Contacto [Kg/cm²] | | | | 5.6 |
| Distancia Entre Ejes de Llantas [cm] | | | | 32.4 |
| Capas | E [Kg/cm²] | μ [] | H [cm] | Ligada ó No |
| 1ª | 63780 | 0.35 | 10 | L |
| 2ª | 6300 | 0.40 | 20 | L |
| 3ª | 2100 | 0.40 | 30 | L |
| 4ª | 700 | 0.45 | | |
| 5ª | | | | |
| 6ª | | | | |

Tablas N° 6. Esfuerzos y deformaciones de la estructura de pavimento utilizando el módulo dinámico de la mezcla asfáltica tipo Marshall.

| Título del Trabajo : Modelación Estructura de Pavimento | | | | | |
|---|--------|---------------|------------------|---------------|------------------|
| Número de Capas : 4 | | | Alternativa : 1 | | |
| Capa N° | Z (cm) | Epsilon T | Sigma T (Kg/cm²) | Epsilon Z | Sigma Z (Kg/cm²) |
| 1ª | 0.00 | 1.3100E-04 B | 1.4888E+01 B | -7.9300E-05 C | 5.5982E+00 A |
| | 10.00 | -1.1300E-04 B | -9.1977E+00 B | 1.2100E-04 B | 1.8457E+00 B |
| 2ª | 10.00 | -1.1300E-04 B | 1.5194E-01 A | 2.6400E-04 B | 1.8457E+00 B |
| | 30.00 | -1.4000E-04 C | -1.0095E+00 C | 1.9400E-04 C | 4.9761E-01 C |
| 3ª | 30.00 | -1.4000E-04 C | -1.1523E-01 C | 2.6800E-04 C | 4.9761E-01 C |
| | 60.00 | -1.1000E-04 C | -2.6512E-01 C | 1.7600E-04 C | 1.6417E-01 C |
| Deflexión = 34.760 mm/100 | | | | | |
| Radio de Curvatura = 355.220 m | | | | | |

Tablas N° 7. Parámetros básicos para modelación de la estructura de pavimento usando el módulo dinámico de la mezcla asfáltica tipo Superpave.









| Número de Capas [2..6] 7 | | | | |
|--------------------------------------|------------|-----------|--------|-------------|
| Radio de Carga [cm] | | | | 10.8 |
| Presión de Contacto [Kg/cm²] | | | | 5.6 |
| Distancia Entre Ejes de Llantas [cm] | | | | 32.4 |
| Capas | E [Kg/cm²] | μ [] | H [cm] | Ligada ó No |
| 1ª | 100080 | 0.35 | 10 | L |
| 2ª | 6300 | 0.40 | 20 | L |
| 3ª | 2100 | .40 | 30 | L |
| 4ª | 700 | 0.45 | | |
| 5ª | | | | |
| 6ª | | | | |


Tabla N° 8. Esfuerzos y deformaciones de la estructura de pavimento utilizando el módulo dinámico de la mezcla asfáltica tipo Superpave.

| Título del Trabajo : Modelación Estructura de Pavimento | | | | | |
|---|--------|---------------|------------------|---------------|------------------|
| Número de Capas : 4 | | | Alternativa : 2 | | |
| Capa N° | Z (cm) | Epsilon T | Sigma T (Kg/cm²) | Epsilon Z | Sigma Z (Kg/cm²) |
| 1ª | 0.00 | 1.0400E-04 B | 1.7743E+01 B | -6.8400E-05 C | 5.5982E+00 A |
| | 10.00 | -9.4300E-05 B | -1.2542E+01 B | 9.4700E-05 B | 1.5092E+00 B |
| 2ª | 10.00 | -9.4300E-05 B | 1.1115E-01 A | 2.1700E-04 B | 1.5092E+00 B |
| | 30.00 | -1.2500E-04 C | -9.1263E-01 C | 1.7700E-04 C | 4.4663E-01 C |
| 3ª | 30.00 | -1.2500E-04 C | -1.0605E-01 C | 2.4300E-04 C | 4.4663E-01 C |
| | 60.00 | -1.0300E-04 C | -2.4677E-01 C | 1.6400E-04 C | 1.5397E-01 C |
| Deflexión = 33.250 mm/100 | | | | | |
| Radio de Curvatura = 438.300 m | | | | | |


De acuerdo con los cálculos arrojados en la modelación (Ver figura N° 6), analizamos los valores de deformación a tracción en la par-

te inferior de la capa asfáltica para su interpretación en las correspondientes leyes de fatiga.

| Tipo de Capa | MARSHALL | Módulo Dinámico (Mpa) | SUPERPAVE | Módulo Dinámico (Mpa) | Espesor capa (Cm) |
|--------------|---|-----------------------|--|-----------------------|-------------------|
| | | | | | |
| CA |  | $E_1 = 6378$ |  | $E_1 = 10008$ | 10 |
| BG |  | $E_2 = 630$ |  | $E_2 = 630$ | 20 |
| SBG |  | $E_3 = 210$ |  | $E_3 = 210$ | 30 |
| SR |  | $E_4 = 70$ |  | $E_4 = 70$ | |



$\epsilon_t = 1.13E-04$



$\epsilon_t = 9.43E-05$

Figura N° 6. Valores de deformación por tracción (ϵ_t) en la parte inferior de la capa asfáltica de acuerdo con la modelación en el software DEPAV.

Con estos valores de deformación acudimos a las leyes de fatiga respectivas para la granulometría y obtenemos el número de repeticiones de carga para cada método; así:

Marshall: $N = 1.5 E+07$

Superpave: $N = 2.5 E+07$

Si consideramos el valor del número de repeticiones de carga (N) obtenido por el método tradicional Marshall como base de comparación y según los resultados mostrados, podemos decir que las mezclas asfálticas elaboradas por el método Superpave pueden soportar un 60 % más de repeticiones de carga que las fabricadas por el

Marshall, lo que representa la fortaleza que promueve la metodología SHRP, a través de su método Superpave.

CONCLUSIONES

- a) La tendencia en el comportamiento a la fatiga es muy similar tanto para las mezclas diseñadas por el método Superpave como para las Marshall; prácticamente exhiben una misma fragilidad, pero se debe destacar que cuando se aplica el mismo esfuerzo a ambas mezclas, la Superpave tendrá menos deformaciones (módulo mucho mayor) y, por lo tanto, soportará mayores repeticiones de carga.
- b) Teniendo en cuenta que los módulos de las mezclas diseñadas por el método Superpave alcanzaron valores cercanos al doble de los logrados por el modelo de Marshall, se esperaba que el comportamiento en fatiga de las primeras fuese más frágil y, por lo tanto, que ésta característica se convirtiera en la debilidad de las mezclas diseñadas por el método volumétrico Superpave. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el comportamiento de una mezcla bajo cargas dinámicas está afectado tanto por la resistencia a la fatiga como por el módulo dinámico desarrollados a la temperatura de trabajo.
- c) La estructura modelada con mezcla asfáltica tipo Superpave, al soportar mayores repeticiones de carga, representa en el tiempo un menor período de intervención en mantenimiento, implicando un ahorro en dinero considerable. Aunque este análisis debe ser más completo y profundo, nos brinda una idea general para posteriores estudios económicos y de factibilidad de implementación del método de diseño volumétrico Superpave en

nuestro país. Ésta es, quizá, la bondad que promueve el programa SHRP impulsando fuertemente el diseño volumétrico Superpave, pretendiendo difundir una metodología que produzca mezclas asfálticas de comportamiento superior, las cuales a través del valor de su módulo dinámico es capaz de soportar una condición de tráfico representado en el número de ejes equivalentes de carga mucho mayor que los obtenidos en la estructura con mezclas tipo Marshall.

- d) Se requiere continuar con las investigaciones sobre la metodología Superpave para determinar claramente los apartes que se pueden adaptar rápidamente y se conviertan en aportes al control de calidad en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.
- e) Es fundamental determinar correlaciones de los valores obtenidos en el laboratorio con los de campo, para evidenciar realmente las bondades de la metodología Superpave. Por esta razón, se debe impulsar el conocimiento y aplicación de dicha metodología y no limitar a la ingeniería colombiana a la adaptación tecnológica y de datos de otros países..

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales por brindar la oportunidad de obtener los valores de los módulos dinámicos de las mezclas asfálticas por medio de su triaxial dinámico tipo Nottingham. Así mismo, a la Universidad del Cauca por la disposición de su laboratorio de pavimentos y el compactador giratorio para la fabricación de las probetas usando la metodología Superpave; a sus geotecnólogo por la colaboración prestada y apoyo en el proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- BENAVIDES, C. A.; CHAVARRO, E. 2000. Apuntes del curso de diseño de pavimentos. Universidad del Cauca, Instituto de Posgrado en Ingeniería Civil.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis. Publication N° FHWA-SA-95-003. February 1995.
- GUZMÁN, M. R, y MARÍN, C. R. 2004. Comparación de las mezclas diseñadas por el método Marshall y las diseñadas por el método Superpave. Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería, área Vías Terrestres. Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2004.
- HUANG, Y. 2004. Pavement analysis and design. Second edition. Editorial Prentice-Hall. PP 297 - 309.
- MORPHY, T. 1998. Superpave, The future of hot mix asphalt pavements. http://www.asphaltinstitute.org/upload/Superpave_Future_HMA_Pavements.pdf. Fecha de consulta 27 de enero de 2007.
- SOLANO et al; 1994. Software DEPAV. Universidad del Cauca. Software de distribución gratuita elaborado durante la Investigación Nacional de Pavimentos.
- TOSTICARELLI, J., et al. 1989. Contribución del grupo de investigación de Rosario al diseño estructural de pavimentos en Argentina. V Congreso Iberoamericano del Asfalto, tomo III. Punta del Este. Uruguay.